

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Rosamaria Hahn

**ESTUDO DE CASO DE UM EVENTO EXTREMO DE
PRECIPITAÇÃO COM O USO DO MODELO WRF**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina, como requisito parcial
para obtenção do grau de bacharel do
Curso de Meteorologia

Orientador: Me. Rubinei Dorneles
Machado

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor
Maiores informações em:
<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Rosamaria Hahn

**ESTUDO DE CASO DE UM EVENTO EXTREMO DE
PRECIPITAÇÃO COM O USO DO MODELO WRF**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Meteorologia e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Meteorologia do Departamento de Física e Meteorologia da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de junho de 2017.

Prof. Renato Ramos da Silva, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Rubinei Dorneles Machado, Me.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato Ramos da Silva Dr.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wendell Rondonelli Gomes Farias, Dr.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Aos meus pais,
Maria das Graças e Carlos,
e aos irmãos Guilherme e Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por ser meu sustento, minha base ao longo deste caminho.

Agradeço aos meus pais, Maria das Graças e Carlos Clemente Hahn, por todo incentivo aos estudos e por acreditarem em mim. Também aos meus irmãos, Guilherme Hahn e Gustavo Hahn, por estarem sempre disponíveis a me auxiliar.

Ao meu orientador Rubinei Dorneles Machado, por todo suporte e dedicação ao longo desses anos. Obrigada por toda paciência e disponibilidade.

Ao meu coorientador Michel Nobre Muza, por se disponibilizar a me ajudar neste trabalho. Obrigada por toda contribuição.

Aos professores Wendell Rondinelli Gomes Farias e Renato Ramos da Silva, por todo auxílio e aprendizado.

Aos meus amigos Roseli de Oliveira e Humberto Ramos, obrigada pelos momentos partilhados, pela ajuda, longas horas de estudo. Obrigada aos colegas de curso Nicole Liebel, Paulo Henrique Silveira, Tayara Tavares e Vitor Goede pelo companheirismo.

Às minhas amigas de vida e de fé Amábile, Fernanda, Gabriella e Luiza, pelo apoio e por me animarem em momentos difíceis.

Ao colega Gabriel Luan Rodrigues, por estar sempre disponível para ajudar e ensinar a utilizar os *softwares* necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

“Finalmente, quando chegar a nossa última hora, será grande e inefável a nossa alegria ao vermos que em todo o nosso trabalho, apenas vislumbramos a infinitude do Criador.”

(Johann Carl Friedrich Gauss)

RESUMO

Os frequentes registros de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina e o Atlas de Desastres Naturais de Santa Catarina indicam que estudar os sistemas atmosféricos que contribuem para esses eventos é de grande importância não só para a meteorologia, como também para a sociedade afetada. Uma das maneiras de compreender os extremos de chuva e contribuir para a prevenção da população ante a um evento, é o estudo através da simulação numérica. Portanto, utilizou-se o modelo numérico WRF para estudar um caso de chuva intensa, associado a um fenômeno de mesoescala. Assim, elencou-se os 15 maiores eventos de precipitação entre os anos de 2010 a 2015 e posteriormente avaliou-se qual evento estava associado à mesoescala. Identificou-se que o alto volume de precipitação (111,4 mm), registrado no dia 18 de setembro de 2015 na cidade de São Joaquim ocorreu pela passagem de um sistema convectivo de mesoescala. Este sistema, durante todo o dia, foi influenciado pela presença do jato de baixos níveis e jato de altos níveis, nos quais contribuíram para o desenvolvimento e intensificação do SCM. Também se verificou, pela carta sinótica, a presença de uma frente estacionária sobre o estado de Santa Catarina. Portanto, o extremo de precipitação registrado ocorreu pela influência da frente estacionária sobre Santa Catarina e do SCM que se deslocou sobre o estado. A fim de avaliar a eficiência do modelo em simular a precipitação foram realizados testes de sensibilidade quanto a parametrização de microfísica. Utilizaram-se dois domínios, de 15 km e 5 km, e realizaram-se quatro experimentos com as parametrizações: WSM3, WSM6 (denominado controle), WDM6 e Lin. A eficiência do modelo foi avaliada através de análises, subjetiva e objetiva, ao confrontar os resultados das simulações com os dados ERA, CPC e GFS. Na análise subjetiva verificou-se que, apesar de o modelo deslocar o evento do seu local de ocorrência, mostrou-se eficiente em simular quantitativamente os maiores volumes de precipitação. Quanto à análise objetiva, calcularam-se índices estatísticos para cada experimento para o ponto de grade mais próximo a estação de São Joaquim. Os índices Bias e RMSE demonstram que todos os experimentos subestimaram a precipitação na localidade em relação ao dado medido, porém o controle e WDM6 mostraram-se mais eficazes em simular quanto à amplitude. O índice $R\sigma$ mostra que o modelo se mostrou pouco eficiente ao simular a chuva no horário de ocorrência. Também analisou-se subjetivamente a temperatura média a 2 metros e o vento médio a 10 metros. Todos os experimentos mostraram resultados semelhantes entre si. Observou-se

uma tendência de superestimar o vento quando comparado com os dados de análise, a temperatura foi superestimada nas simulações na região Oeste e subestimada na região Planalto Norte.

Palavras-chaves: Evento extremo, precipitação, WRF.

ABSTRACT

Frequent recordings of extreme events of precipitation in Santa Catarina and the Atlas of Natural Disasters indicate that study atmospheric systems that contribute to these events are very important not only for Meteorology, but also to an affected society. A way to understand rain extremes and contribute to prevent population before an event is to study it through numerical simulation. So WRF numerical model was used to study an event of intense rain, associated to a phenomenon of mesoscale. This way, it was listed 15 biggest precipitation events between 2010 and 2015 and after it was evaluated which event was associated with mesoscale. It was identified that high volume of precipitation (114,4 mm) was registered on 18th of september, 2015 in São Joaquim City. It occurred by the passage of a connective event with mesoscale. From satellite images analysis, it was assumed that the main cause of this event was connected to the mesoscale. During all day this system was influenced by the presence of low level jets and high level jets, which contributed to develop the intensification of mesoscale convective system. It was also verified that by synoptic letter, the presence of a stationary front over the state of Santa Catarina, precipitation's extreme point registered occurred by the stationary front influence over the state of Santa Catarina and mesoscale convective system that moved over the state. To evaluate this model efficiency on simulate a precipitation, tests of sensibility about microphysics standardization were made, Two domains were used, from 15 km and 5 km, and four experiments were made with the standardizations: WSM3, WSM6(denominated control), WDM6 and Lin. This model efficiency was evaluated through subjective and objective analysis when confronting results of simulations with data ERA, CPC and NCEP. On subjective analysis it was verified that, even though the model moved the event from where it happened, it was shown efficient on simulate high volumes of precipitation, quantitatively. On objective analysis, statistical indexes were calculated for each experiment to the grade point nearest to the station of São Joaquim city. Bias and RMSE indexes demonstrated that all experiments underestimated the precipitation in this place about measured data, but control and WDM6 had shown more efficiency in simulation to the amplitude. Indexe R_{σ} show that the model had shown low efficiency while simulating rain at the time it occurred. It was also analyzed in a subjective way the medium temperature into 2 meters and a medium wind on 10 meters. All the experiments had shown similar results. It was observed a tendency to

overestimate width when compared with analysis data, temperature was overestimated on simulations on West region and underestimated on Northern Plateau.

Keywords: Extreme events, precipitation, WRF

LISTA DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Localização das estações convencionais do INMET (círculo) e estação automática da Epagri/CIRAM(x) utilizadas neste estudo..... | 32 |
| Figura 2: Domínios da simulação do WRF utilizados neste estudo..... | 36 |
| Figura 3: Imagens satélite Goes-13, canal 4, dia 18/09/2015..... | 39 |
| Figura 4: Carta sinótica do dia 18/09/2015 às 12 UTC..... | 40 |
| Figura 5: Magnitude do vento (m/s) e linhas de corrente no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015..... | 41 |
| Figura 6: Cisalhamento do vento (m/a) entre os níveis de 700 e 850 hPa do dia 18/09/2015..... | 42 |
| Figura 7: Componente meridional (m/s) do vento no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015..... | 43 |
| Figura 8: Componente zonal (m/s) do vento no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015..... | 44 |
| Figura 9: Linhas de Corrente e magnitude do vento (m/s) no nível de 200 hPa do dia 18/09/2015..... | 45 |
| Figura 10: Umidade específica média (g/kg) do dia no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015..... | 46 |
| Figura 11: Precipitação acumulada entre 18/09 e 19/09/2015 da análise do CPC (fig. 11a), do ERA (fig. 11b) e experimento WRF com chuva de cumulus e de microfísica (fig.11.c)..... | 48 |
| Figura 12: Precipitação acumulada entre os dias 18/09 e 19/09/2015 do experimento de controle (fig. 12a), Lin (fig. 12b), WSM3 (fig. 12c) e WDM6 (fig. 12d)..... | 50 |
| Figura 13: Temperatura média do ar a 2 metros (sombreado) e intensidade e direção do vento a 10 metros (vetores) do dia 18/09/2015..... | 52 |
| Figura 14: Acumulado de chuva horário observado (linha azul), simulado pelo experimento WSM3 (barra vermelha), WDM6 (barra verde), Lin (barra roxa) e Controle (barra azul)..... | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Recordes de volume de precipitação entre os anos 2010 e 2015 registrados nas estações convencionais do INMET consideradas neste trabalho | 33 |
| Tabela 2: Parametrizações utilizadas na grade de 15 km | 35 |
| Tabela 3: Parametrizações utilizadas na grade de 5 km | 35 |
| Tabela 4: Índices estatísticos | 37 |
| Tabela 5: Índices estatísticos dos experimentos calculados para o dia 18/09/2015..... | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCM Complexo Convectivo de Mesoescala
CPC Climate Prediction Center
CPTEC Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSA Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecast
Epagri/CIRAM Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações e Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
GFS Global Forecast System
GOES Geostationary Operational Environmental Satellites
IDL Interactive Display Language
INMET Instituto Nacional de Meteorologia
INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change
JAN Jato de Altos Níveis
JBN Jato de Baixos Níveis
LI Linha de Instabilidade
SCM Sistema Convectivo de Mesoescala
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina
UTC Universal Time Coordinated
WDM6 Weather Reaserch Forecast Single Moment-6 class
WSM3 Weather Reaserch Forecast Single Moment-3 class
WSM6 Weather Reaserch Forecast Double Moment-6 class
WRF Weather Reaserch Forecast

Sumário

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 27 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral..... | 27 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos..... | 27 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 28 |
| 2.1 | EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO | 28 |
| 2.2 | MODELAGEM NUMÉRICA DE TEMPO | 29 |
| 3 | METODOLOGIA E DADOS..... | 32 |
| 3.1 | SELEÇÃO E ANÁLISE SUBJETIVA DO EVENTO EXTREMO | 32 |
| 3.2 | MODELAGEM NUMÉRICA DO EVENTO | 34 |
| 3.3 | ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO..... | 36 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 38 |
| 4.1 | ANÁLISE SINÓTICA DO EVENTO..... | 38 |
| 4.2 | ANÁLISE SUBJETIVA DOS EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDADE..... | 46 |
| 4.3 | ANÁLISE OBJETIVA DA PRECIPITAÇÃO..... | 53 |
| 5 | CONCLUSÃO | 55 |
| 6 | REFERÊNCIAS..... | 57 |

1 INTRODUÇÃO

A região Sul do Brasil é a que apresenta uma melhor distribuição anual de precipitação, que exceto em algumas áreas, varia entre 1250 mm a 2000 mm (QUADRO et al., 1996). Os sistemas que mais contribuem para este volume regular de chuva são as frentes frias (OLIVEIRA, 1986), as quais, segundo Fernandes e Satyamurty (1994), colaboram para a ocorrência de tempo severo mais frequentemente nas estações primavera e verão. Volumes elevados de precipitação também são provocados pelos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (CUSTÓDIO E HERDIES, 1994).

Dentre os estados da Região Sul, Santa Catarina apresenta um extenso histórico de desastres naturais. O Atlas de desastres naturais de Santa Catarina (HERRMANN, 2006) lista como os *Flash Floods* (enxurradas) o desastre natural mais frequente no estado, os quais podem estar associados a eventos extremos de precipitação. Há uma expressiva contribuição dos SCM em casos de extremos de precipitação (LOUREIRO et al., 2014; SLEIMAN E SILVA, 2010). Isto porque a ocorrência destes pode estar relacionada ao tempo severo, como fortes tempestades e tornados, principalmente na região oeste do estado catarinense, causando danos sociais e econômicos à população (MARCELINO, 2004).

Os SCM podem ser classificados como: linhas de instabilidade (LI) ou complexos convectivos de mesoescala (CCM) se apresentarem uma forma circular ou apenas SCM caso apresente forma irregular. A classificação de sistemas de mesoescala é realizada, geralmente, a partir de recursos como imagens satélite e de radar (MADOXX, 1980; HOUZE, 1993; MACHADO et al., 1993; MEDEIROS et al. 2010). Apesar destes sistemas atuarem na mesoescala, eles são fortemente influenciados por forçantes de escala sinótica (BROWNING, 1986), tais como Jatos de Baixos Níveis, Jatos de Altos Níveis, Alta da Bolívia, Baixa do Chaco ou aproximação de frentes frias.

Os fenômenos de mesoescala citados acima apresentam um histórico extenso de danos causados em Santa Catarina (ESTIVALLET et al., 2008; NASCIMENTO E DOSWELL, 2006). Portanto, estudar as causas e consequências destes fenômenos sobre o estado é importante para diminuir os prejuízos à sociedade observados até então.

Uma das formas de analisar os eventos atmosféricos que causam condições severas e extremas de tempo e que muitas vezes são

de difícil previsibilidade é utilizar a modelagem numérica da atmosfera, assim como realizado por Oliveira et al., (2013) e Salvador et al., (2011). A partir dos modelos numéricos que representam as condições físicas da atmosfera é possível em muitos casos simular os eventos de interesse e reproduzir a condição em que atmosfera se apresentava no momento da ocorrência do fenômeno. E assim, compreender os mecanismos e a dinâmica destes eventos com o intuito de diminuir o impacto negativo causado pelos eventos extremos.

Como exemplo do uso de modelagem numérica para investigar SCM é possível citar Campos et al., (2008) que utilizaram o modelo BRAMS para simular a ocorrência de um CCM no nordeste da Argentina. Os resultados demonstraram que a partir da simulação foi possível compreender a dinâmica do evento de forma detalhada. De maneira semelhante, Santos e Nascimento (2013) utilizaram o modelo WRF na Bacia do Prata, para simular um CCM que apresentou precipitação acumulada diária superior a 100 mm. Os resultados também demonstraram que o modelo reproduziu com eficiência o ciclo de vida do sistema. Ainda utilizando o WRF, Cardoso e Silva (2015) estudaram quais condições atmosféricas estão associadas ao CCM. Isto possibilitou investigar com mais profundidade um caso isolado no Sul do Brasil e contribuiu para o auxílio de tomada de decisão de centros de previsão e defesa civil quando da ocorrência de novos eventos semelhantes.

A ocorrência de uma linha de instabilidade no nordeste do Brasil foi estudada por Cavalcanti (2009), em que avaliou a habilidade do modelo MM5 em simular este fenômeno. Cavalcanti (2009) reforça a necessidade do desenvolvimento de estudos sobre modelagem numérica para reprodução satisfatória de eventos de precipitação. Com o uso do WRF, Abreu e Hallak (2016) investigam a formação de convecção vigorosa no estado de São Paulo. Os resultados mostram que a assimilação de dados contribuiu para a representação do deslocamento de sistemas.

Portanto, selecionou-se o estado de Santa Catarina pelo o histórico de eventos extremos e desastres naturais (SILVA E NUNES, 2011; MEDINA et al. 2010) e com o intuito de continuar contribuindo para a mitigação de fenômenos atmosféricos que causam prejuízos ao estado, selecionou-se um evento extremo de precipitação ocorrido em setembro de 2015.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar desempenho do modelo WRF em reproduzir um evento extremo de precipitação durante a ocorrência de um fenômeno pertencente à mesoescala sobre o estado de Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Selecionar um evento extremo de precipitação associado a um fenômeno atmosférico de mesoescala sobre Santa Catarina.
- b) Avaliar desempenho do modelo WRF em reproduzir a precipitação ocorrida, levando em consideração a sensibilidade do modelo quanto a parametrização de microfísica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO

O IPCC (2012) define um evento extremo como sendo a ocorrência de uma variável acima de um valor de referência. Loureiro et al. (2014) definiram o valor de referência, em um estudo de evento de precipitação, pelo método estatístico de *Percentis*, com limiares de 34% e 66%. Ao analisar eventos extremos de chuva na região do Ártico, Glisan et al., (2014), utilizaram percentil 99% para definição destes.

Eventos de precipitação extrema podem causar desastres, como inundação e deslizamentos, que geram prejuízos e transtornos para sociedade. Diante deste cenário, o estudo de tais extremos é necessário para aplicar medidas preventivas de possíveis perdas.

Carvalho et al., (2002) estudaram eventos extremos de precipitação na região sudeste do Brasil. Verificaram que 65% desses eventos ocorreram quando foi observada a atividade da Zona de convergência do Atlântico Sul, com um agravante em episódios de El Niño.

A região Norte do país, mais precisamente o estado do Pará, foi estudada por Loureiro et al., (2014). Neste estudo, indicam que os maiores acumulados de precipitação na região ocorreram pela influência da Zona de convergência Intertropical.

Estudos de casos anteriores de sistemas convectivos de mesoescala mostram que a investigação destes eventos se dá, principalmente, por observações. Como Madoxx (1980), que investigou 43 casos de SCM a partir de observações que indicavam tempo severo, como granizo, vento intenso, tornado, na região central dos Estados Unidos em 1978. Assim como observado por Madoxx, Anabor (2004) também encontrou resultados semelhantes para a América do Sul durante os anos 1999 a 2001 com o registro de 49 casos de SCM. No Brasil, a região Sul do Brasil é uma das localidades que mais é atingida por esses sistemas (VELASCO e FRITSCH, 1987, CAMPOS et al., 2008, DURKEE e MOTE, 2009).

A atuação de um SCM sobre a região Sul foi estudada por Moraes (2014). A passagem deste sistema provocou precipitação intensa no estado do Rio Grande do Sul, em algumas localidades o acumulado representou cerca de 43% do total esperado no mês.

A região Sul apresenta uma maior frequência de eventos

extremos de precipitação no Brasil, como mostrado por Camargo et al., (2011). E como exemplo podem ser citados inúmeros estudos que reforçam esta informação, tais como, Teixeira (2010) que investigou os principais sistemas e padrões sinóticos responsáveis por episódios de precipitação extrema no Sul do Brasil. Observou também, que estes episódios tendem a ocorrer nas estações de transição (outono e primavera).

De forma semelhante, Severo (1996) estudou chuvas intensas no estado de Santa Catarina. Neste estudo, observou que o jato de altos níveis exerce grande influência na ocorrência desses eventos.

O evento de precipitação extrema de 2008, ocorrido no Vale do Itajaí/SC, foi estudado por Almeida (2013). Com o uso do modelo WRF e dados observados, este autor mostrou que o episódio esteve associado à persistência de um bloqueio e a presença de um vórtice ciclônico em médios níveis.

2.2 MODELAGEM NUMÉRICA DE TEMPO

Eventos extremos de precipitação são amplamente estudados através do uso de modelagem numérica. Além de ser utilizado para maior entendimento de sistemas que ocasionam chuva intensa, também contribuem para avaliar a eficiência do modelo em prever tais eventos.

Cardoso et al., (2012) utilizaram o modelo regional WRF para estudar precipitação extrema climática entre 1989-2009 na Península Ibérica. Concluíram que, embora o modelo apresente um bom desempenho, apresentou certa dificuldade para reproduzir a precipitação no verão e em casos mais extremos.

O modelo WRF também foi utilizado por Brito et al. (2011), em que simulou precipitação extrema em Manaus-AM no período do verão. Ao utilizarem três esquemas de convecção de parametrização cumulus,, concluíram que a parametrização Grell-Devenyi apresentou a melhor performance.

Homann et al., (2010) utilizaram o WRF para avaliar a eficiência em simular a passagem de uma frente fria no estado do Rio Grande do Sul no dia 30 de novembro de 2009, que se caracterizou como evento severo. O modelo se mostrou capaz em simular o deslocamento do sistema, assim como a precipitação para a cidade de São Borja, onde foi registrado um acumulado de 59 mm e o modelo reproduziu um volume de 60 a 70 mm.

Ainda para o Rio Grande do Sul, Zapparoli et al., (2010), utilizou o modelo BRAMS para reproduzir um evento de precipitação extrema causado por um CCM em janeiro de 2009. A simulação permitiu identificar regiões com potencial para desenvolvimento de tempestades.

Para avaliar o desempenho de simulações numéricas alguns autores, como Machado e Rocha (2010), Fonseca (1998), Anthes et al., (1989) e Leivas et al., (2011), utilizaram índices estatísticos.

O modelo de previsão ARPS foi avaliado por Hallak e Filho (2011) em simular sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo. Foram utilizados índices estatísticos e também proposto um novo índice de destreza para avaliar a eficácia do modelo.

A eficiência do modelo OLAM foi avaliada por D'Alesio (2015) para a região leste de Santa Catarina. Ao simular precipitação, o modelo apresentou-se mais eficiente nas primeiras 48 horas.

Almeida e Marton (2014) simularam com o WRF o evento de chuvas intensas em novembro de 2008 no estado de Santa Catarina. A partir a simulação foi possível observar com maior detalhamento as condições dinâmicas e termodinâmicas, assim como os núcleos de precipitação.

No presente trabalho avaliou-se a parametrização de Microfísica. No modelo WRF os processos de precipitação, vapor da água e nuvens, são resolvidos explicitamente na forma de esquemas de parametrizações. Nesses esquemas são construídas, no lugar dos complexos modelos teóricos, fórmulas alternativas simplificadas para resolver os termos associados aos fluxos turbulentos de momento, calor e umidade que aparecem devido à integração das equações (OLIVEIRA, 2012).

Com o intuito de observar o comportamento do processo de Microfísica do modelo WRF, sobre a região de Brasília/DF, Coelho e Pereira (2013) comparou simulações com diferentes parametrizações de microfísicas. Em todas as simulações o modelo tendeu a superestimar a precipitação, sendo que os resultados utilizando o esquema WSM3 indicam uma melhor previsibilidade.

Este resultado foi semelhante ao encontrado por Comin et al., (2016), em que analisaram o desempenho do WRF para a Antártica. Os autores concluíram que para casos em que há a influência de ciclones, o esquema WSM3 é mais indicado.

Um evento tornádico ocorrido em Santa Catarina foi simulado por Oliveira (2017), para isto utilizou o modelo WRF. Ao realizar 4 experimentos, com diferentes parametrizações, Oliveira (2017),

concluiu que neste caso a Camada Limite Planetária exerce maior influência.

Oliveira (2014) avaliou o desempenho do modelo WRF em simular precipitação no estado do Rio Grande do Sul. Através do índice estatístico Erro Médio, concluiu que quando utilizado o esquema cumulus Kain-Fritsch o modelo reproduz maiores volumes de chuva do que quando utilizado o esquema Betts-Miller-Janjic.

Ainda, Junior et al., (2016), avaliaram a sensibilidade do modelo WRF quanto as suas parametrizações durante o inverno de 2014 no Rio Grande do Sul. Ao testar os esquemas de microfísica WSM3, WSM5 e Goddard Cumulus Ensemble (GCE), quando utilizado o esquema GCE nas combinações com os demais esquemas, é o que melhor caracteriza o estado atmosférico.

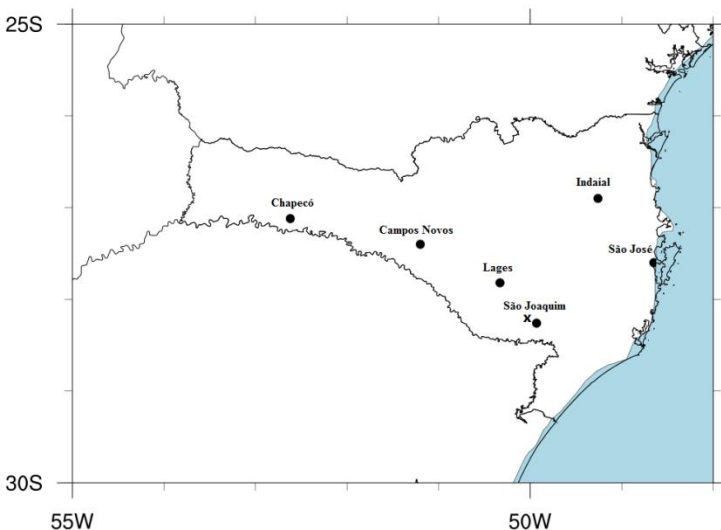
3 METODOLOGIA E DADOS

Nos próximos itens será apresentada a metodologia para a seleção e análise subjetiva do evento alvo deste trabalho, dados e imagens de satélite utilizados. A descrição do modelo atmosférico considerado e como o desempenho do modelo será analisado de forma objetiva e subjetiva também são descritos.

3.1 SELEÇÃO E ANÁLISE SUBJETIVA DO EVENTO EXTREMO

Com o objetivo de identificar eventos extremos de chuva, associados a sistemas convectivos de mesoescala, foram utilizados dados de precipitação de estações convencionais do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de 6 cidades de Santa Catarina. Os dados disponibilizados pelo INMET para a série selecionada limitam-se apenas para as 6 estações convencionais apresentadas na figura 1. Para que não haja sinais de possíveis variações decadais limitou-se os dados em 6 anos (01/2010 a 12/2015), e listou-se os 15 maiores volumes de chuva da série temporal selecionada (tabela 1).

Figura 1: Localização das estações convencionais do INMET (círculo) e estação automática da Epagri/CIRAM(x) utilizadas neste estudo



A determinação dos eventos como sendo evento extremo de precipitação foi obtida pela metodologia proposta por Wilks (2006), aqui considerado como um evento de precipitação intensa volumes de chuva acima do percentil 90%. Utilizou-se o software estatístico IDL 7.1 (*Interactive Display Language*) para aplicação dos cálculos de percentis, que foram calculados através da distribuição de probabilidade Gama. A distribuição Gama é frequentemente utilizada (TEDESCHI; GRIMM; CAVALCANTI, 2016), pois representa de maneira adequada a precipitação.

Tabela 1: Recordes de volume de precipitação entre os anos 2010 e 2015 registrados nas estações convencionais do INMET consideradas neste trabalho

| Ranking | Cidades | Volume (mm) | Data |
|---------|---------------|-------------|------------|
| 1 | Florianópolis | 253 | 19/05/2010 |
| 2 | Florianópolis | 144,4 | 22/11/2011 |
| 3 | Campos Novos | 141,8 | 30/08/2011 |
| 4 | Chapecó | 138,5 | 01/05/2014 |
| 5 | Chapecó | 137,1 | 14/07/2015 |
| 6 | Chapecó | 135,8 | 27/06/2014 |
| 7 | Campos Novos | 130,9 | 01/05/2014 |
| 8 | Chapecó | 117,2 | 13/10/2011 |
| 9 | Chapecó | 115,1 | 22/06/2011 |
| 10 | São Joaquim | 113,8 | 14/10/2014 |
| 11 | Florianópolis | 113,4 | 13/03/2011 |
| 12 | Lages | 113,3 | 09/08/2011 |
| 13 | Campos Novos | 112,8 | 23/10/2012 |
| 14 | São Joaquim | 111,6 | 09/08/2011 |
| 15 | São Joaquim | 111,4 | 18/09/2015 |

Para identificar os eventos causados por fenômenos de mesoescala foi realizada uma análise subjetiva dos 15 eventos listados

na tabela 1. Utilizou-se a classificação segundo Orlanski (1975) para determinar a escala espacial e temporal, e imagens do satélite Goes-13 canais 4 (infravermelho termal) fornecidos pelo DSA/CPTEC/INPE.

Para a análise subjetiva foram utilizados os dados de análise do ECMWF denominada ERA-Interim (DEE et al., 2011), dos horários sinóticos das 0Z, 6Z, 12Z e 18Z, com resolução de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$. Com o objetivo de identificar padrões provocados por jatos de baixos níveis e jatos de altos níveis utilizou-se os campos de vento zonal e meridional em 850 hPa, 700 hPa e 200 hPa. Para avaliar se houve influência do jato de baixos serão utilizados os critérios de Bonner (1968), que especifica que a magnitude do vento em 850 hPa é superior a 12 m/s, cisalhamento do vento entre 850 hPa e 700 hPa superior a 6 m/s e a componente meridional negativa é maior que a componente zonal em módulo.

3.2 MODELAGEM NUMÉRICA DO EVENTO

Utilizou-se o modelo WRF (Weather Research Forecast) a fim de avaliar sua eficiência em reproduzir a chuva no espaço e no tempo, no caso de um evento extremo de precipitação. O WRF é um modelo regional, não hidrostático e compressível. Foi desenvolvido com apoio de vários centros de pesquisa, como, o National Center for Atmospheric Research (NCAR) e o National Center for Environmental Prediction (NCEP/NOAA), (SKAMAROCK et al., 2008).

Com o WRF é possível detalhar a área de interesse com maior resolução espacial utilizando o aninhamento, sem que todo o domínio tenha que ser processado com um espaçamento de grade muito pequeno (CARVALHO, 2015). Os domínios considerados na simulação do WRF são apresentados na figura 2. Foram utilizadas duas grades aninhadas com resolução horizontal de 15 km e de 5 km.

Utilizou-se 38 níveis na vertical (com topo em 50 hPa) e um time step de 150 segundos. Na tabela 2 são apresentados os esquemas em relação a física do modelo para grade de resolução de 15 km. Os esquemas utilizados para esta grade foram as sugeridas na configuração inicial do modelo.

Tabela 2: Parametrizações utilizadas na grade de 15 km

| Parametrizações | Opções |
|--------------------------|----------------------------------------------------|
| Ondas curtas | Dudhia (1989) |
| Ondas longas | RRTM (MLAWER et al., 1997) |
| Camada limite planetária | YSU (HONG et al., 2006) |
| Camada superficial | Noah Land-Surface Model (GUO-YUE NIU et al., 2011) |
| Cumulus | Kain-Fritsch (1993) |
| Microfísica | WSM6 (HONG and LIM, 2006) |

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo frente ao evento simulado quanto às parametrizações de microfísica foram realizados quatro experimentos na grade de maior resolução espacial (tabela 3). Quanto ao esquema cumulus, foi desligada, pois sugere-se que para grades menores que 5 km a parametrização de cumulus seja desligada (PENNELLY et al. 2014; SIKDER e HOSSAIN, 2016; JEE e KIM, 2017). Os demais esquemas para esta grade foram mantidos iguais aos apresentados na tabela 2.

Tabela 3: Parametrizações utilizadas na grade de 5 km

| Microfísica | Cumulus |
|---------------------------|-----------|
| WSM6 (HONG and LIM, 2006) | Desligado |
| Lin et al. (1983) | |
| WSM3 (HONG et al., 2004) | |
| WDM6 (LIM and HONG, 2010) | |

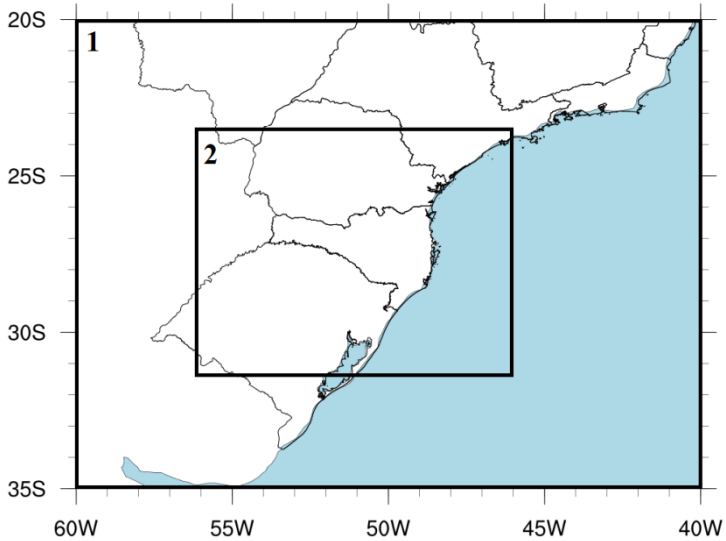
A parametrização de microfísica resolve os problemas de formação de hidrometeoros. Os esquemas Lin e WRF Single Moment-6 class (WSM6) representam seis classes de hidrometeoros. O WSM6 é uma evolução do WSM3 (WRF Single Moment-3 class) que representa três classes de hidrometeoros. O WDM6 (WRF Double Moment-6 class) é baseado no WSM6, sua vantagem é simular além da quantidade também a distribuição de gota na nuvem.

Cada experimento teve período total de simulação de 48 horas com o início às 00 UTC do dia 18/09/2015. Foram descartadas as primeiras 12 horas devido ao período de spin-up, como sugerem Carvalho et al. (2012), Santos (2014) e Filho et al. (2016).

Os dados utilizados para inicializar o modelo e de fronteira foram os do ECMWF denominado ERA-Interim (DEE et al., 2011), dos

campos geopotencial, temperatura potencial e de superfície, pressão, componentes meridional e zonal do vento e razão de mistura, com resolução de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$.

Figura 2: Domínios da simulação do WRF utilizados neste estudo



3.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO

Para avaliar a eficiência do modelo realizou-se análise a subjetiva. Comparou-se os experimentos simulados contra os dados os dados de precipitação do *Climate Prediction center* (CPC; SILVA et al., 2007), com resolução $1^\circ \times 1^\circ$ e do ECMWF denominada ERA-Interim (DEE et al., 2011), com resolução de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$. O dado do CPC é baseado nas estações pluviométricas de todo o globo, o do ERA-Interim, além de se basear em dados de estações meteorológicas, também coleta dados de radares e satélites, entre outras fontes.

Para avaliar temperatura do ar a 2 metros e vento a 10 metros, utilizou-se dados da análise do *Global Forecast System* (GFS SAHA et al, 2010), de resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, e também ERA-Interim, já mencionado anteriormente.

Realizou-se também a análise temporal objetiva, utilizando 5 índices estatísticos (tabela 4), com o intuito de avaliar, tanto a fase quanto a amplitude, se o modelo reproduziu no ponto de grade mais próximo a estação meteorológica de São Joaquim a precipitação. Foram utilizados os dados da estação automática da Epagri/CIRAM de São Joaquim (figura 1).

Tabela 4: Índices estatísticos

| Índices estatísticos | Símbolo | Unidade |
|----------------------------------------|------------|--------------|
| Erro médio (<i>bias</i>) | B | °C e m/s |
| Raiz quadrada do erro quadrático médio | RSME | °C e m/s |
| Razão dos desvios | R σ | Adimensional |

Os índices *bias* e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) foram utilizados para indicar a amplitude entre observado e simulado, ou seja, se o modelo subestimou ou superestimou o volume de chuva. O *bias* é definido como:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_S - P_O) \quad (1)$$

Sendo P_S a precipitação simulada e P_O a precipitação observada. O índice raiz quadrada do erro quadrático médio é dado por:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_S - P_O)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

O comportamento do modelo em fase é analisado através do resultado da razão dos desvios padrão, que indica se o modelo foi capaz de reproduzir a precipitação no horário em que foi registrado chuva. O cálculo do desvio padrão (S) é dado por:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P - \bar{P})^2}{N-1}} \quad (3)$$

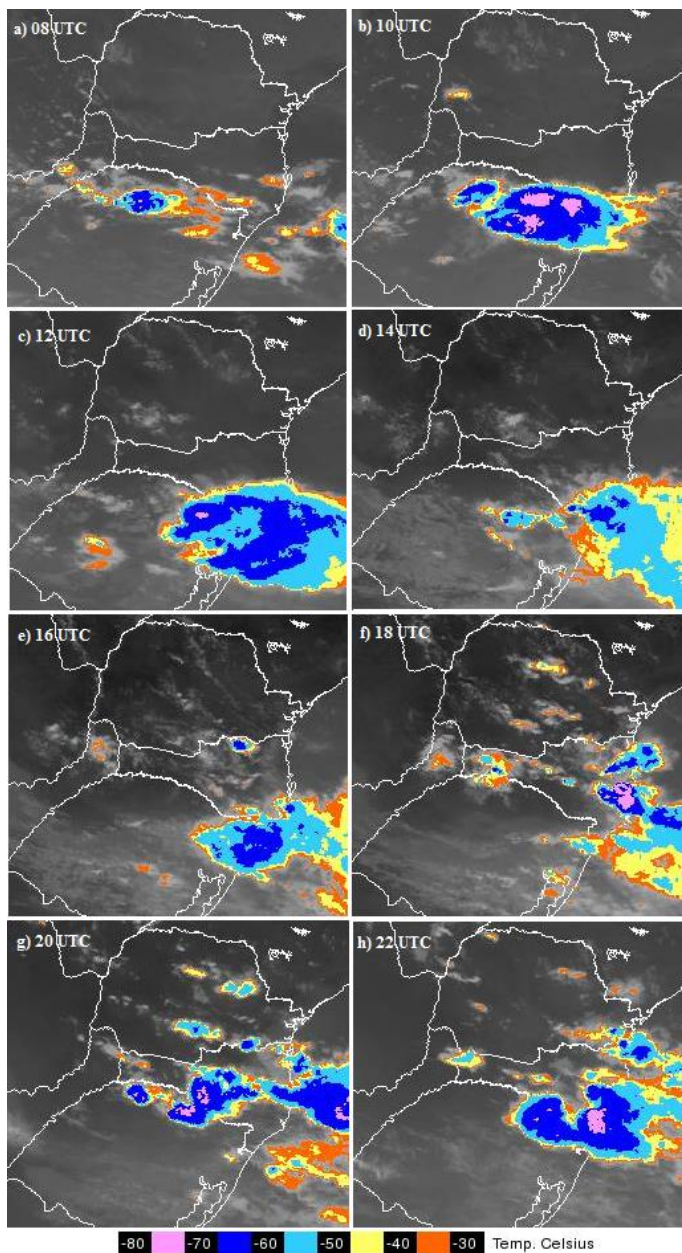
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE SINÓTICA DO EVENTO

Desta forma, investigou-se registros de precipitação intensa no estado de Santa Catarina (tabela 1), para identificar possíveis fenômenos de mesoescala que causaram altos acumulados de chuva. A partir de uma análise através de imagens de satélite e aplicando os critérios de Orlanski (1975), observou-se que dentre os eventos ocorridos apenas um configura-se como evento na escala de meso α , em que houve um registro de chuva acumulada de 114,3 mm em São Joaquim (28,27°S; 49,93°O), no dia 18 de setembro de 2015. Este resultado, de haver apenas um evento de mesoescala entre os 15 listados na tabela 1, pode estar relacionado a dois fatores: de que os maiores volumes de chuva em Santa Catarina são causados por sistemas de escala sinótica (frentes frias), como observado por Oliveira (1986), e pela escassez de dados no estado, pois como os eventos de mesoescala são localizados (apresentam escala espacial e temporal menores), dificilmente seria possível obter dados com frequência adequada para eventos isolados.

A figura 3 mostra uma sequência de imagens satélite que possibilita analisar o evento ocorrido no dia estudado. Na figura 3a observa-se uma formação de nuvens convectivas no noroeste do Rio Grande do Sul, divisa com Santa Catarina, que se movimentam em direção ao nordeste do Rio Grande do Sul. Ao longo da trajetória o sistema passa entre o norte do Rio Grande do Sul e sudeste/sul de Santa Catarina. Pelas imagens de satélites (figura 3b), verifica-se que às 10 UTC foi o horário que o sistema teve seu maior desenvolvimento, pois é o horário em que a área do topo da nuvem a -70°C tem maior extensão. Na figura 3d às 14 UTC começa o estágio de dissipação, pois o topo da nuvem não apresentam temperaturas tão frias e o sistema começa a perder a sua forma.

Figura 3: Imagens satélite Goes-13, canal 4, dia 18/09/2015

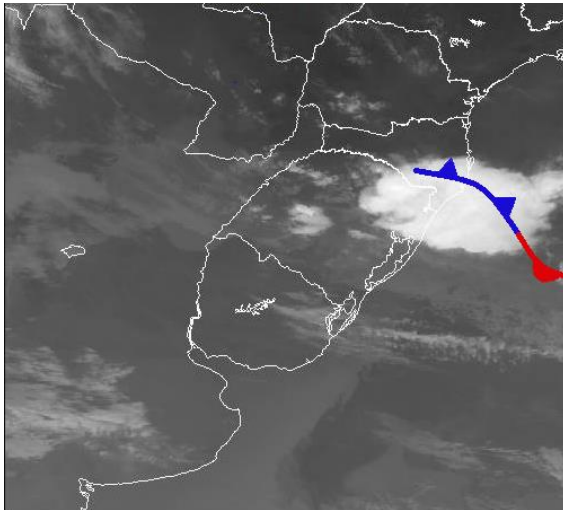


Pelos critérios propostos por Madoxx (1980), para a determinação de um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), este sistema não segue as configurações de um CCM, pois não mantém sua forma circular por, pelo menos, 6 horas seguidas.

Ainda, pelas imagens de satélite, não é possível classificar este sistema como uma linha de instabilidade, pois não apresenta uma organização linear, como já observada por Silva Dias e Lima (1982). Também não pode determinar como vírgula invertida, pois não apresenta um padrão de vírgula como proposto por Reed (1979), com a cabeça e cauda do sistema bem definido. Portanto, pode-se classificá-lo como um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM). Também é observada a formação de novos núcleos convectivos (Figura 3g) no Meio Oeste de Santa Catarina, e deslocam-se para o leste enquanto alguns núcleos de topo frio atuam sobre o litoral de Santa Catarina.

A formação de SCM também pode sofrer influências pela aproximação de frentes frias. No dia estudado nota-se uma frente fria sobre o Oceano Atlântico na altura de Santa Catarina (figura 4). Esta frente fria prolonga-se com um ramo estacionário até o norte da Argentina e passa sobre o Rio Grande do Sul. Este sistema pode ter influenciado para o alto volume de chuva registrado em São Joaquim.

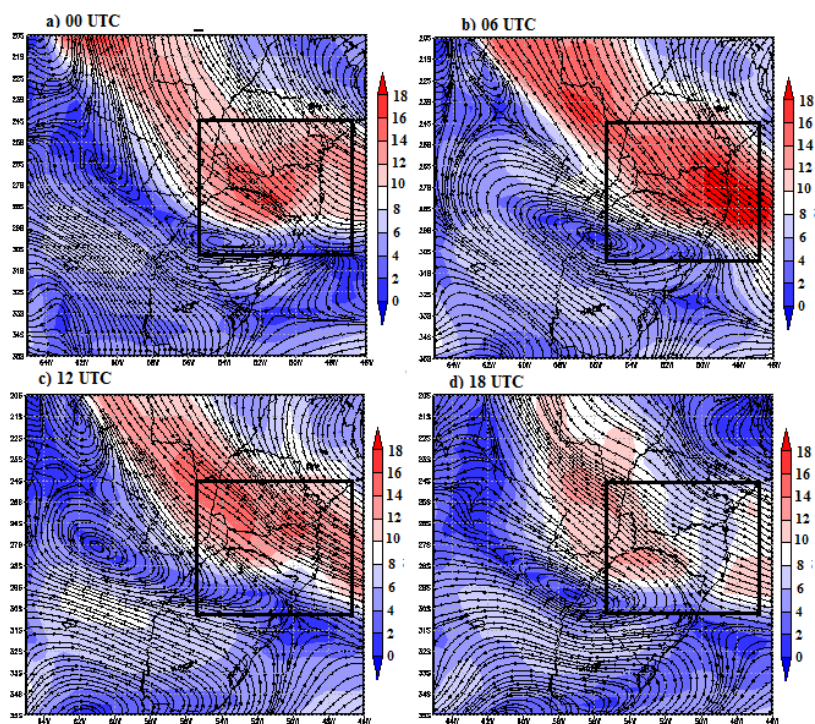
Figura 4: Carta sinótica do dia 18/09/2015 às 12 UTC



Um mecanismo que contribui para a formação e desenvolvimento de SCM são os jatos de baixos níveis (CAVALCANTI,

1982), que são frequentemente observados na primavera ao leste das Cordilheiras dos Andes (MARENGO E SOARES, 2002). Para verificar se no dia 18 de setembro de 2015 houve a presença dos jatos de baixos níveis foi utilizado o Critério 1 de Bonner (BONNER, 1968). Os critérios sugeridos por Bonner são: magnitude do vento em 850 hPa superior a 12 m/s, cisalhamento do vento entre 700 hPa e 850 hPa superior a 6 m/s e componente meridional negativa e superior a componente zonal.

Figura 5: Magnitude do vento (m/s) e linhas de corrente no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015

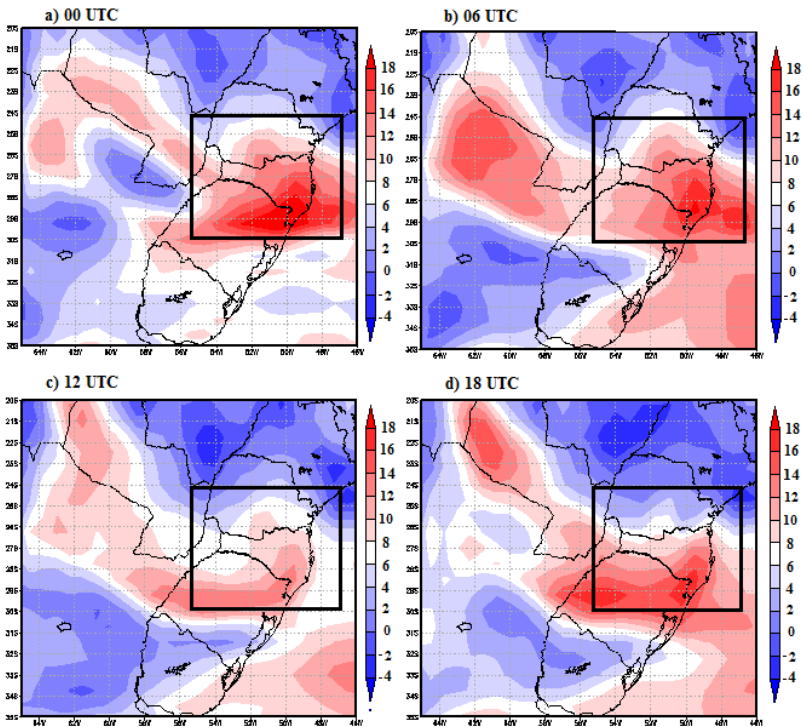


Nas figuras 5^a, 5^b e 5^c verifica-se que a magnitude do vento em 850 hPa das 00 UTC às 18 UTC foi superior a 12 m/s sobre o nordeste e norte do Paraguai, sobre Santa Catarina e Paraná (06 UTC). O horário que apresentou a maior intensidade do vento coincide com aquele que o sistema começou a se desenvolver, como já analisado nas imagens de satélite. Na figura 5 observa-se também um padrão de baixa pressão,

entre a divisa do Rio Grande do Sul e Argentina e parte do sul do Paraguai. Este sistema pelo critério de Orlanski (1972) se enquadra como sendo uma mesobaixa, que influencia nos movimentos verticais em superfície, mais especificamente com convecção em suas periferias, ou seja, nas áreas de desenvolvimento das células de tempestades estudadas.

Em todos os horários o cisalhamento do vento entre os níveis de 850 hPa e 700 hPa foi superior a 6 m/s (figura 6), principalmente no estado do Rio Grande do Sul, nordeste da Argentina, sudoeste e noroeste do Paraguai e em Santa Catarina.

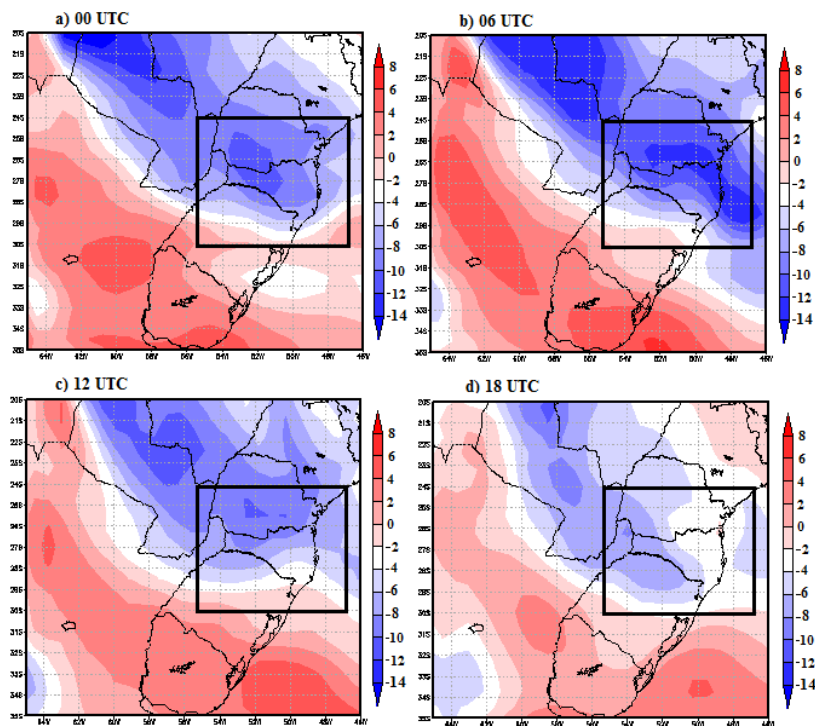
Figura 6: Cisalhamento do vento (m/a) entre os níveis de 700 e 850 hPa do dia 18/09/2015



A componente meridional é negativa (figura 7), que significa que a direção do vento naquela localidade é predominantemente de norte, e superior em módulo ao vento zonal (figura 8) nos horários 00 e 06 UTC, ou seja, o escoamento de direção norte/sul é superior ao

escoamento de direção leste/oeste. Portanto, pelos critérios de Bonner é observado a presença do JBN, com maior intensidade entre às 12 UTC e 18 UTC.

Figura 7: Componente meridional (m/s) do vento no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015

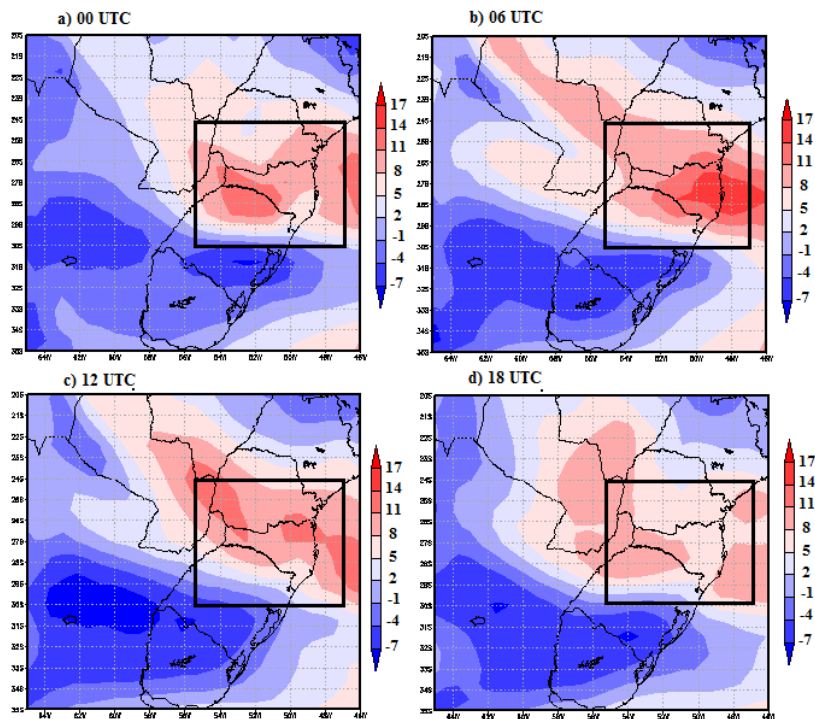


O fluxo médio diário de calor e umidade proveniente da Amazônia está presente durante todos os horários (figura 10). Sugere-se que este fluxo tenha contribuído para a formação e intensificação do SCM, pois os ventos a leste dos Andes em 850 hPa transportam calor e umidade para as regiões sudeste da América do Sul como já discutido por Marengo et al (2004).

Além do JBN também verificou-se a presença do Jato de Altos Níveis (JAN), que segundo Guedes (1985), também contribui para a formação e intensificação de sistemas de mesoescala. Na figura 9 observa-se que há a presença do jato com sua maior intensidade no

horário das 00 UTC e 06 UTC (Figuras 9a e 9b). O JBN está posicionado a noroeste do JAN, conforme a figura 5, e este posicionamento pode explicar o desencadeamento da convecção próximo à saída do JBN (Velasco e Fritsch, 1987).

Figura 8: Componente zonal (m/s) do vento no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015



Desta maneira é possível relacionar o desenvolvimento e intensificação do SCM às forçantes sinóticas atuantes JBN e JAN, que estiveram intensos, não só no horário de gênese, mas também durante todo o dia estudado.

Conforme discutido por Cavalcanti et al. (2009), ainda que os estudos da formação e desenvolvimento dos SCM na América do Sul não expliquem quais os mecanismos que disparam as primeiras células convectivas, supõe-se que os sistemas analisados contribuem para a gênese destes sistemas.

Figura 9: Linhas de Corrente e magnitude do vento (m/s) no nível de 200 hPa do dia 18/09/2015

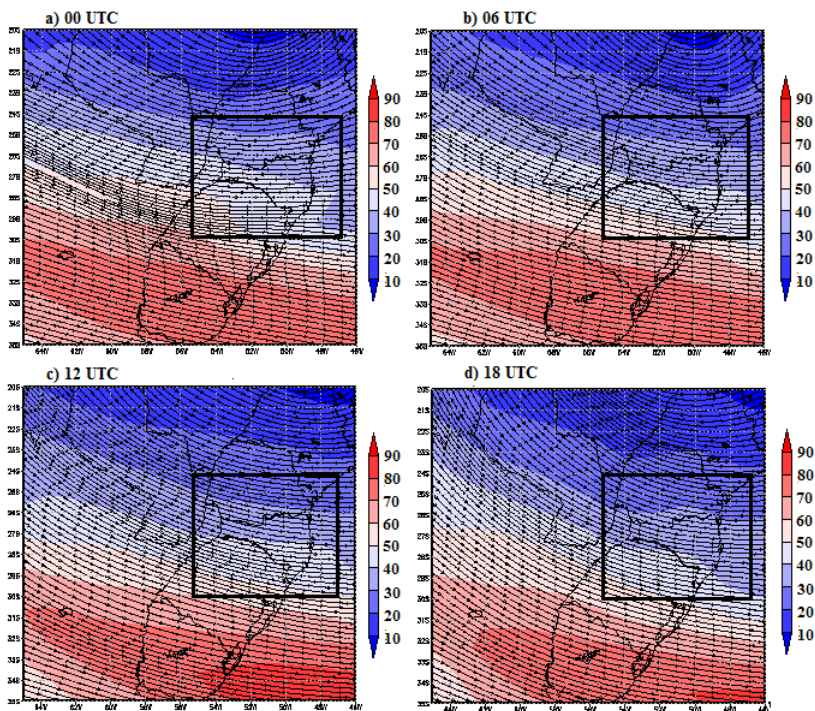
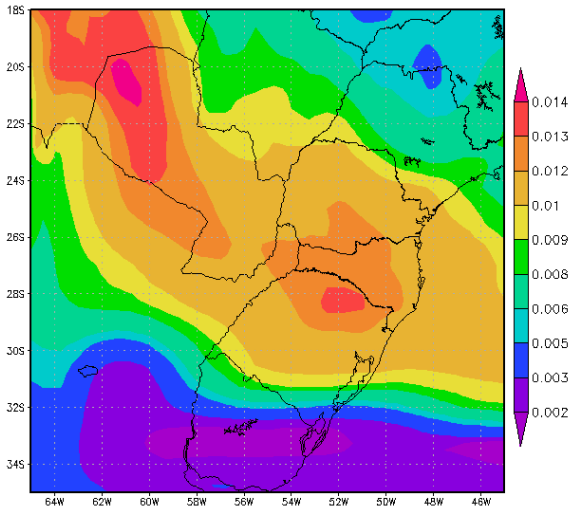


Figura 10: Umidade específica média (g/kg) do dia no nível de 850 hPa do dia 18/09/2015



4.2 ANÁLISE SUBJETIVA DOS EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDADE

Os resultados das simulações numéricas utilizando o modelo WRF foram avaliados a partir das variáveis de chuva, temperatura do ar a 2 metros e vento a 10 metros. Para isto, realizou-se 4 experimentos, alterando a parametrização de sensibilidade, nos quais foram comparados com a análise do CPC (precipitação), ERA-Interim (precipitação, temperatura e vento médio), denominado aqui como ERA, e GFS (temperatura e vento médio).

Utilizou-se a precipitação do ERA-Interim pois este foi utilizado como condição inicial e de fronteira. Desta maneira é possível avaliar se o WRF corrige ou refina o dado do ERA-Interim, já que leva em consideração as condições de terreno e utilizou-se uma resolução maior.

Na figura 11 são apresentados as análises do CPC (figura 11a), do ERA (Figura 11b) e o experimento para a variável precipitação acumulada quando somadas as precipitações de microfísica e cumulus. A análise ERA, indica os volumes mais elevados de precipitação no

litoral e centro do Rio Grande do Sul. Já a análises CPC mostra maiores acumulados no Litoral e Planalto Sul de Santa Catarina e parte do nordeste do Rio Grande do Sul. Observa-se uma diferença acentuada entre as análises, em que o CPC indica volumes de até 55 mm e o ERA de 300 mm.

Para Santa Catarina as análises estendem a chuva para todas as regiões. O CPC mostra volumes mais baixos para Santa Catarina em relação ao ERA no Litoral e Planalto Sul de Santa Catarina e no Rio Grande do Sul.

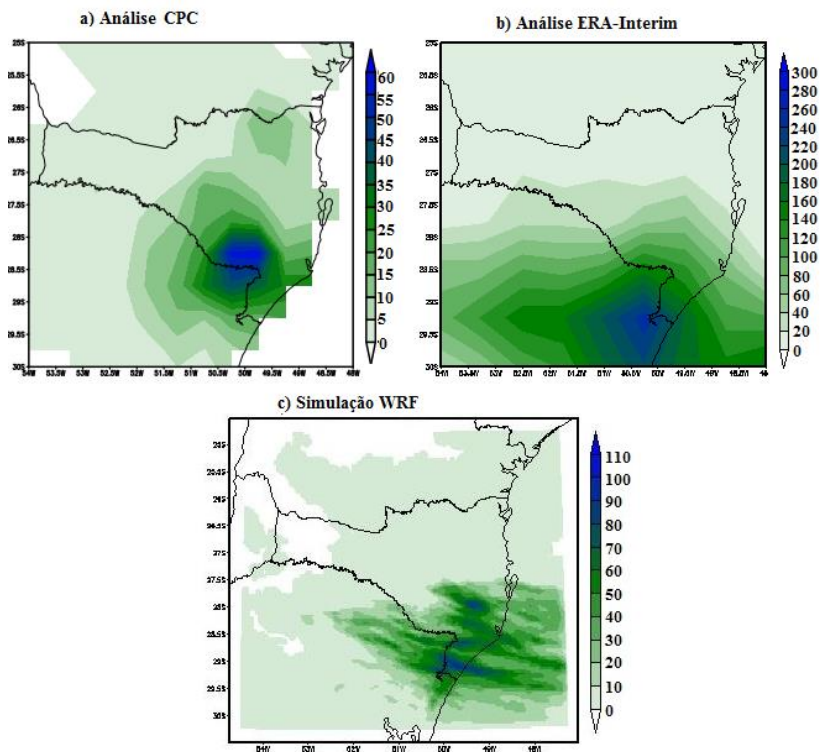
Quanto ao Planalto Sul, região na qual ocorreu o evento extremo em questão, em ambas as análises há presença de chuva, porém o ERA indica acumulados acima de 140 mm, enquanto o CPC acumulados de até 55 mm. Esta diferença pode estar associada a uma menor resolução da análise CPC ($1^\circ \times 1^\circ$), enquanto a análise do ERA tem uma resolução maior. Para a região da Grande Florianópolis (que abrange os municípios de Garopaba, Alfredo Wagner e Tijucas) é possível observar que houve pouca precipitação, entre 5 a 15 mm conforme mostra o CPC. Isto concorda com o acumulado registrado do dia na estação do INMET em São José, de 14,3 mm.

Em relação a figura 11c, que apresenta a simulação de controle, observa-se que a simulação apresenta acumulados elevados no Planalto e Litoral Sul, entre 50 e 80 mm. A simulação concorda com as análises quanto à precipitação no Oeste do estado, em que mostra pouca de chuva na região. De maneira geral a simulação se assemelha mais a análise do CPC, pois limitam a precipitação mais acentuada para o Planalto e Litoral Sul.

A simulação com o WRF subestima ligeiramente a precipitação para as regiões Litoral Norte e Alto Vale, pois simulou chuva de até 10 mm, enquanto o CPC mostra volumes entre 10 e 20 mm para estas regiões. Em relação ao ERA, para estas regiões, há concordância entre a simulação e o dado.

Para o Meio Oeste do estado o simulado mostra volume baixo de chuva, de até 10 mm, o CPC mostra volumes de até 20 mm, e o ERA mostra volumes de até 40 mm para a parte sul desta região. Na região Oeste o experimento de controle mostra regiões com ausência de chuva, isto não é apresentado pelas análises, porém estas também mostram acumulados baixos nesta região.

Figura 11: Precipitação acumulada entre 18/09 e 19/09/2015 da análise do CPC (fig. 11a), do ERA (fig. 11b) e experimento WRF com chuva de cumulus e de microfísica (fig.11.c).



Foi realizada também uma análise subjetiva com os demais experimentos (figura 12), em que se analisou apenas a precipitação de microfísica. É possível observar que em todas as figuras apresentadas há uma concordância ao indicar precipitação entre o Litoral Sul de Santa Catarina e parte do nordeste do Rio Grande do Sul.

Para a região do Planalto Sul, há uma divergência dos experimentos com a análise do ERA, enquanto a análise mostra acumulado máximo de 160 mm aproximadamente, os experimentos mostram acumulados de até 60 mm. Os experimentos mostram resultados semelhantes entre si, com acumulados mais significativos à sudeste da região Planalto Sul.

Na região da Grande Florianópolis, todos os experimentos mostram acumulados semelhantes aos apresentados pelas análises, precipitação de aproximadamente 40 mm. Observa-se também precipitação mais significativa até a latitude 27°S (Florianópolis).

Todos eles indicam pouca precipitação no Alto Vale, de até 10 mm. Isto concorda com as análises apresentadas na figura 11 e também com os dados de estações meteorológicas da Epagri/CIRAM, nas quais indicam acumulados de até 16 mm.

Resultado semelhante ao do Alto Vale foi observado no Litoral Norte, em que há uma concordância entre todos os experimentos com o ERA. É observado que há pouca precipitação, de até 10 mm.

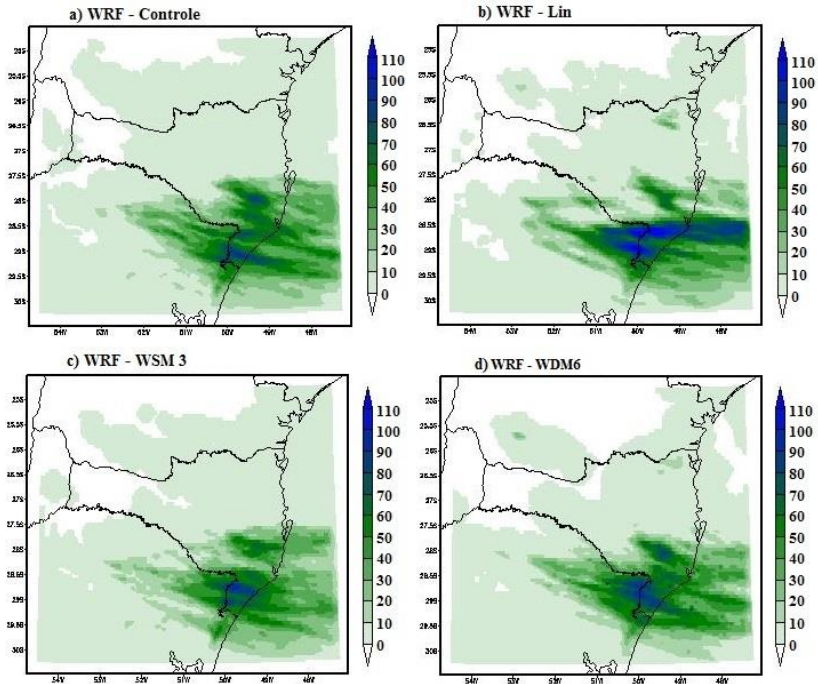
No Planalto Norte há uma discordância entre os experimentos Lin e WSM 16 com os experimentos de controle e WSM3. Enquanto o Lin e WSM indicam a ausência ou pouca chuva na parte do oeste da região e acumulado de até 30 mm à leste, os demais mostram volumes de 10 mm em toda região e de forma homogênea.

Para região Meio Oeste, os experimentos se assemelham de maneira espacial à análise do CPC, em que mostra volumes baixos de precipitação e em partes ausência de chuva. Já o ERA mostram volumes elevados de até 40 mm para boa parte da região.

Outra região que mostrou grande concordância entre os experimentos foi o Oeste de Santa Catarina, em que todos eles mostram nenhuma ou pouca precipitação nesta região. Neste caso há semelhança dos experimentos com a análise do CPC.

Por fim, os experimentos e análise do ERA, na região nordeste do Rio Grande do Sul as análises indicam volumes significativos de precipitação. O experimento Lin destaca-se dos demais, com volumes de até 110 mm. Isto converge com o observado na análise CPC, porém não com acumulados tão significativos.

Figura 12: Precipitação acumulada entre os dias 18/09 e 19/09/2015 do experimento de controle (fig. 12a), Lin (fig. 12b), WSM3 (fig. 12c) e WDM6 (fig. 12d)



Entre os experimentos de sensibilidade observa-se que os resultados são semelhantes entre si na distribuição espacial de chuva. Os acumulados se concentram principalmente nas regiões Planalto e Litoral Sul, parte da Grande Florianópolis e nordeste do Rio Grande do Sul.

Os experimentos de controle, WSM3 e WDM6 apresentam resultados semelhantes tanto na distribuição, quanto nos acumulados, em que há volumes elevados de chuva no extremo do litoral sul de Santa Catarina, de até 90 mm, e também nas regiões do Planalto Sul e Grande Florianópolis, com acumulados de até 70 mm. Ainda, o experimento Lin apresentou acumulados elevados, de até 110 mm, no Planalto Sul e parte do nordeste do Rio Grande do Sul.

Dentre os quatro experimento o Lin foi o que menos se assemelhou aos demais, pois simulou volumes altos para uma região extensa. Por outro lado, o WSM3 mostra volumes ligeiramente mais baixos que os

outros. Silva (2013) encontrou resultado semelhante, em que concluiu que ao utilizar esta parametrização o modelo não consegue capturar a chuva em termos de seu posicionamento e sua intensidade.

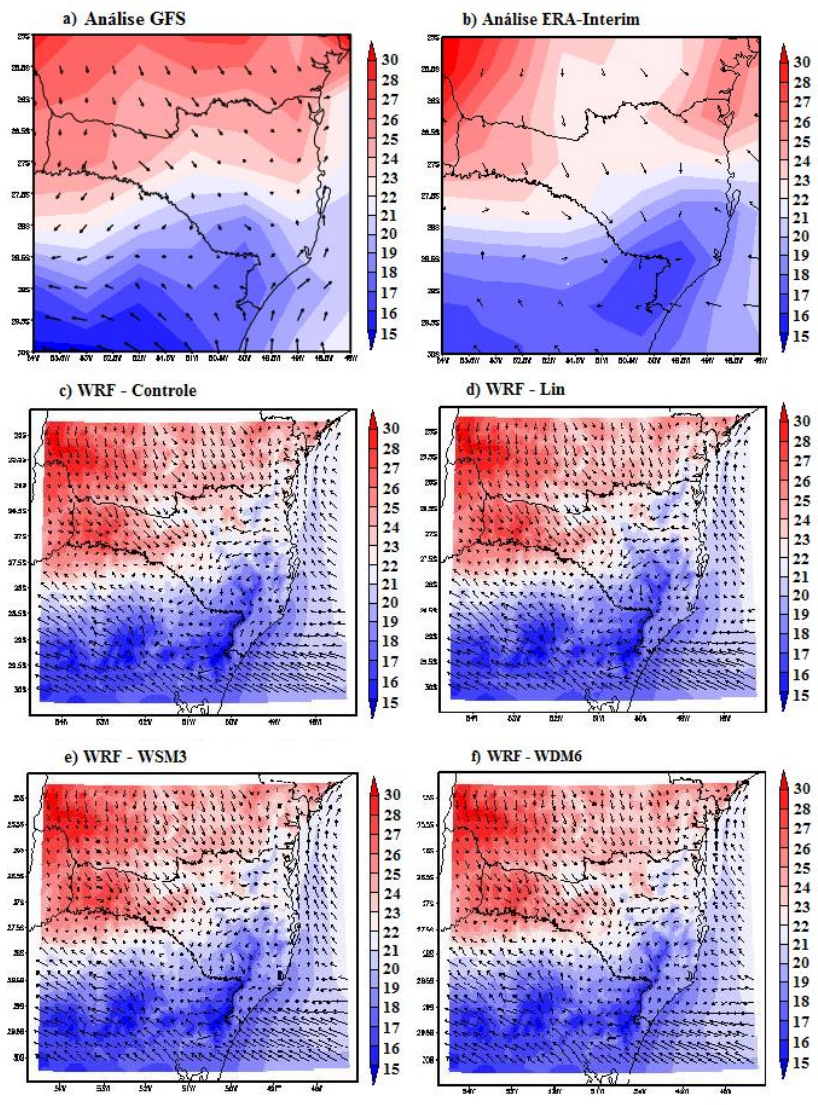
Na figura 13 apresenta-se a variável temperatura do ar a 2 metros e vento a 10 metros. A figura 13a mostra a análise GFS, a figura 13b do ERA. O ERA mostra, em relação ao GFS, temperaturas mais baixas para o norte e oeste de Santa Catarina e temperaturas mais altas para o sul. Ou seja, mostra um gradiente maior de temperatura. É possível observar que, em relação aos demais experimentos, o experimento Lin (fig 13.d) simula temperaturas ligeiramente mais baixas na região Litoral Norte e Alto Vale.

Há coerência entre os experimentos para as duas variáveis. A temperatura foi mais elevada na região Oeste de Santa Catarina entre 25 e 27°C e mais baixa nas regiões Planalto e Litoral Sul, onde ocorreram maiores volumes de precipitação. O vento, representado por vetores, também é muito semelhante nos quatro experimentos, e mostram maior intensidade no Oeste e parte do Planalto Sul e ventos menos intensos no litoral e Planalto Norte. É possível notar também convergência de vento entre o Meio Oeste (vento na direção NW) e Planalto Sul (vento na direção NE). Isto pode ter favorecido para a ocorrência de precipitação intensa registrada no dia.

Ao comparar a variável vento apresentada nas figuras 13.a e 13.b com o simulado pelo modelo, nota-se que para algumas regiões, em todos os experimentos, o modelo tendeu a superestimar a intensidade. Resultado este também apresentado por Ruiz et al. (2010), em que simularam o vento para regiões da América do Sul com o modelo WRF, além de observarem que a velocidade foi subestimada, em todos os experimentos realizados não expressaram diferenças significativas entre si.

Nota-se que quando comparado os experimentos aos dados de análise, os experimentos tenderam a simular temperaturas mais altas no Oeste de Santa Catarina, também apresentam temperaturas menores na região Planalto Sul. É possível relacionar isto à variável precipitação, pois os maiores volumes de chuva se concentraram no Planalto Sul e nordeste do Rio Grande do Sul, de forma que, pela influência da nebulosidade, essas regiões receberam menos radiação solar. O oposto ocorreu no Oeste de Santa Catarina, com pouco volume de chuva observado e períodos de pouca nebulosidade podem ser notados na figura 3.

Figura 13: Temperatura média do ar a 2 metros (sombreado) e intensidade e direção do vento a 10 metros (vetores) do dia 18/09/2015.



É possível afirmar, em uma análise subjetiva, que os experimentos se aproximam mais à análise do ERA. Este resultado é também

observado para a variável precipitação. Isto pode estar relacionado ao fato de que o modelo WRF foi integrado utilizando o ERA como condição inicial e de fronteira. O que demonstra que, embora o WRF possua independência na resolução dos processos físicos, algumas características atmosféricas do modelo global permanecem presentes nos resultados do modelo regional.

4.3 ANÁLISE OBJETIVA DA PRECIPITAÇÃO

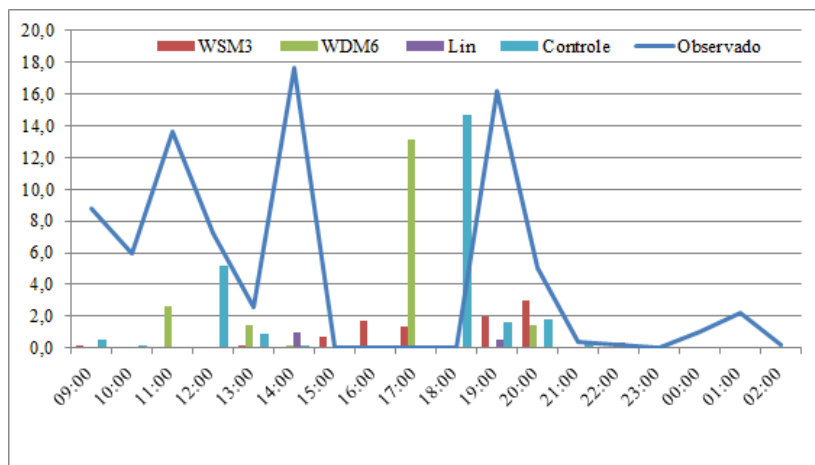
Selecionou-se o ponto de grade mais próximo a estação meteorológica com o intuito de analisar objetivamente a eficiência do modelo em prever a precipitação. Pelo motivo da estação do INMET ser convencional e registrar a chuva apenas uma vez ao dia, utilizou-se os dados da estação automática mais próxima, da EPAGRI/Ciram, na qual registrou um acumulado de 72,2 mm. Para analisar a evolução temporal da chuva apresenta-se a figura 14.

Observa-se que os máximos de chuva registrados ocorreram às 11, 14 e 19 horas do dia 18. Estes horários coincidem com períodos com presença de maior nebulosidade (figura 3). Houve um período com ausência de atividade convectiva intensa na cidade (figura 3f, g), horários em que não foi registrado precipitação (figura 14).

Para realizar a análise objetiva foram calculados índices estatísticos que possibilitam analisar o desempenho do modelo em simular em fase e amplitude (tabela 5) o dado observado. Os índices *Bias* e RMSE avaliam o desempenho do modelo quanto à amplitude e o índice *R_s* quanto à fase.

Nota-se que os experimentos WSM3 e Lin, para este ponto de grade, não foram hábeis em simular quantitativamente a precipitação. Ambos subestimaram mais a chuva em relação aos demais experimentos, o experimento WSM3 simulou 9,3 mm e o Lin 1,9 mm. Isto é evidenciado pelo índice *Bias* (tabela 5), em que mostra que o WSM3 e Lin subestimaram a chuva observada em -2,6 e -2,9 mm, respectivamente.

Figura 14: Acumulado de chuva horário observado (linha azul), simulado pelo experimento WSM3 (barra vermelha), WDM6 (barra verde), Lin (barra roxa) e Controle (barra azul)



Os experimentos WDM6 e de controle simularam 19,1 e 25,1 mm, respectivamente. Apesar de apresentarem maiores volumes em relação aos demais experimentos, não reproduziram com eficiência em fase, como mostra o índice $R\sigma$, no qual o ideal é que seja mais próximo a 1.

Tabela 5: Índices estatísticos dos experimentos calculados para o dia 18/09/2015

| | <i>Bias</i> | RMSE | $R\sigma$ |
|----------|-------------|------|-----------|
| WSM3 | -62,9 | 5,8 | 6,8 |
| LIN | -70,3 | 5,9 | 24,7 |
| WDM6 | -53,2 | 6,3 | 2 |
| CONTROLE | -47,1 | 6,4 | 1,6 |

5 CONCLUSÃO

Selecionou-se o maior volume de precipitação causado por um sistema convectivo de mesoescala, dentre os 15 maiores volumes de chuva dos anos 2010 a 20115 em Santa Catarina. O evento ocorreu no município de São Joaquim, no dia 18/09/2015, no qual foi registrado 111,4 mm.

A análise através das imagens satélite mostra que o sistema atuante se tratava de um SCM e a carta sinótica mostra que havia também uma frente estacionária sobre o estado. Outros fenômenos que podem ter contribuído para o alto volume registrado foi a presença dos jatos de alto e baixos níveis.

Simulou-se a precipitação acumulada do dia 18 a fim de realizar testes de sensibilidade da parametrização de microfísica. Em uma análise subjetiva, observou-se que quando utilizadas as parametrizações WSM6 (controle) e WDM6, obteve-se resultados semelhantes. Cassola et al. (2015), também mostraram que resultados mais satisfatórios foram encontrados quando utilizada a parametrização WSM6. Sugerem a simulação de alta resolução para resultados mais realistas.

Por outro lado o experimento Lin e controle mostram volumes mais elevados em relação aos demais, o oposto observou-se para o WSM3. Ao simular chuva intensa para o estado de Santa Catarina, Almeida e Marton (2014), utilizaram a parametrização de microfísica WSM3 e também a precipitação foi subestimada. Silva e Fisch (2013) também encontraram o mesmo resultado ao utilizar a parametrização WSM3 para simular precipitação.

Em todos os experimentos há o registro de núcleos de alto volume de precipitação, com valores próximos ao registrado pela estação localizada em São Joaquim. Como bem observa Fiori et al. (2013), ao reproduzir um evento que ocasionou precipitação de 500 mm no Mediterrâneo, o modelo pode deslocar o evento em relação à realidade. Isto pode ter ocorrido com o caso aqui estudado.

Os resultados da análise objetiva reforçam o resultado obtido na análise subjetiva, em que os índices estatísticos *Bias* e *RMSE* mostram que o simulado subestima a precipitação observada. Para o ponto

analisado, os experimentos que mais se assemelham ao observado quanto à amplitude são o de controle e WDM6. Isto reforça os resultados das análises subjetivas. Estes experimentos também mostraram valores mais próximos ao valor ideal de $R\sigma$ ($R\sigma=1$) em relação aos demais (WSM3 e Lin).

Resultado semelhante foi apresentado por Gelpi et al (2016), em que ao combinar as parametrizações WSM6 com Kain-Fritsch obtiveram menor índice *Bias*, comparadas às demais parametrizações.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados experimentos com grades de 1 km e 10 km, com o objetivo de verificar se o modelo apresenta mais eficiência ao simular em fase, ou seja, simula os horários de ocorrência de chuva. Também se sugere que para a grade de 10 km sejam realizados testes de sensibilidade quanto à parametrização de cumulus, para avaliar se a simulação mostra-se mais eficiente em simular o volume de chuva.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, R. C.; HALLAK, R. **Análise de mesoescala de um evento convectivo em São Paulo e da assimilação de dados em simulações com o modelo WRF**. 2AD.[s.n.], São Paulo, 2016.

ALMEIDA, V. A. **CHUVAS INTENSAS EM SANTA CATARINA: Análise sinótica de um evento extremo e experimentos numéricos com o modelo atmosférico WRF**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, V. A.; MARTON, E. Chuvvas intensas em Santa Catarina: Análise Sinótica de um evento extremo e simulação numérica com o modelo atmosférico WRF. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 37, p. 169-179. 2014

ANABOR, V. **Análise descritiva dos sistemas convectivos de escala meso- α através das imagens de satélite GOES-8**. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre (RS), 74p., 2004.

ANTHES, R. A., KUO, Y.H., HSIE, E. Y., LOW-NAM, S., BETTGE, T.W., Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, vol. 115, pp. 763-806, 1989.

BONNER, W. D. Climatology of the low level jet. **Monthly Weather Review**, v.96, n. 12, p. 833-850, 1968

BRITO, A. L., VEIGA, J. A. P., ARANHA, A. F. Simulação de um caso de evento extremo de chuva na cidade de manaus-am com o modelo wrf: O caso 17 de fevereiro de 2011. Em: , Anais do IV Simpósio Internacional de Climatologia, João Pessoa - PB. 2011

BROWNING, K. A. Conceptual models for precipitation systems. **Weather and Forecasting**, v. 1, p. 23-41, 1986

CAMARGO, C. G.; BRAGA, H.; MALANDRINI, D. A.; MACHADO, L. Análises de eventos extremos de precipitação na região Sul do Brasil: dados históricos. Guarapari/ES. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. 2011.

CAMPOS, J. R. C.; LIMA, S. C. E.; PINTO, L. B. . Complexo Convectivo de Mesoescala observado em 27/11/2002 no nordeste da Argentina. **Anuário do Instituto de Geociências** (UFRJ. Impresso) , Resubmetido, v. 31, p. 23-32, 2008

CARDOSO, N. L.; SILVA, V. M. Análise de um Sistema Convectivo no Sul do Brasil Utilizando Índices de Instabilidade **Ciência e Natura**, v. 38, p. 404-412, 2015.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern south america and large-scale convective patterns in the south atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. **Environmental Modelling & Software**, v. 33, p. 23-34, 2012.

CASSOLA, F.; FERRARI, F.; MAZZINO, A. Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using diferente approches. **Atmospheric Research**. v. 164-165. p. 210-225. 2015.

CAVALCANTI, I.F.A. **Um estudo sobre interações entre circulações locais e circulações de grande escala.** (INPE– 2494–TDL/097).

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, M.; ASSUNÇÃO, F. DA S.D.; GERTRUDES, A.; SILVA, J. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 182. 2009.

COELHO, S.A.; PEREIRA, A.V. **Avaliação dos prognósticos de precipitação para os diferentes esquemas de microfísica gerados pelo modelo de mesoescala WRF na região de Brasília -DF**. Instituto de Controle do Espaço Aéreo, 2013.

COMIN, A. N.; SOUZA, R. B.; ACEVEDO, O.; ANABOR, V. Análise do Desempenho do Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) com Diferentes Esquemas de Microfísica e Camada Limite Planetária na Ilha Deception, Antártica. **Rev. bras. meteorol.** v. 31, n.4, pp.415-427, 2016.

CUSTÓDIO, M. A. M.; HERDIES, D. L., 1994. O jato de baixos níveis a leste da Cordilheira dos Andes - um estudo de caso. Congresso Brasileiro de Meteorologia, v.8., Belo Horizonte-MG. Anais II. p. 617-619. 1994.

D’ALESIO, H. A. **Análise do desempenho Olam na previsão numérica para o Sul do Brasil**. Universidade Federal da Santa Catarina. 2015.

DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ANDRAE, U., BALMASEDA, M. A., BALSAMO, G., BAUER, P., BECHTOLD, P., BELJAARS, A. C. M., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., DELSOL, C., DRAGANI, R., FUENTES, M., GEER, A. J., HAIMBERGER, L., HEALY, S. B., HERSBACH, H., HOLM, E. V., ISAKSEN, L., KALLBERG, P., KOHLER, M., MATRICARDI, M., MCNALLY, A. P., MONGE-SANZ, B. M., MORCRETTE, J. J., PARK, B. K., PEUBEY, C., DE ROSNAY, P., TAVOLATO, C., THEPAUT, J. N., and VITART, F.: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, **Q. J. Roy. Meteorol. Soc.**, 137, 553– 597, doi:10.1002/Qj.828, 2011.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, p. 3077–3107, 1989.

ESTIVALLET, J., OLIVEIRA, R., SHEUER, P., SILVA, L., ESPÍNDOLA, L.P. LA NIÑA e EL NIÑO: **A Influência nas ocorrências tornádicas em Santa Catarina**. Monografia (Curso Técnico de Meteorologia) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FERNANDES, K. A.; SATYAMURTY, P., 1994. Cavados invertidos na região central da América do Sul. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8:93-94. Belo Horizonte MG. Anais II.

FIGUEIRED, J. C.; SCOLAR, J. Estudo da Trajetória dos Sistemas Convectivos de Mesoescala na América do Sul. Anais do VII Congresso Argentino de Meteorologia, Buenos Aires, set. 1996.

FILHO, V. P. S.; SANTOS, E. B.; GANDU, A.W.; CAVALCANTE, A. M. B; MAIA, L. P. J.; Sensibilidade das parametrizações cumulus do WRF 3.7 sobre a região norte do NEB – Um estudo de caso. XIX CBMET, João Pessoa/PB. 2016.

FIORI, E.; COMELLAS, A.; MOLINI, L.; REBORA, N.; SICCARDI, F.; GOCHIS, D.J.; TANELLI, S.; PARODI, A. Analysis and hindcast simulations of an extreme rainfall event in the Mediterranean area: The Genoa 2011 case. **Atmos. Res.** 138, 13–29. 2014.

Fonseca, J. F. B., **Modelos regionais de previsão numérica do tempo: Um estudo comparativo das destrezas dos modelos FSU e ETA, sobre a América do Sul**. Tese de Mestrado-INPE, 1998.

GELPI, I. R.; GAZTELUMENDI, S.; CARREÑO, S.; HERNANDEZ, R.; EGAÑA, J. Study of NWP parametrizations on extreme precipitation events over Basque Country. **Adv. Sci. Res.** v. 13, p. 138-144. 2016.

GEORGE, J. J. Weather Forecasting for Aeronautics. **Academic Press**, . 673 pp. 1960.

GLISAN, J. M. and GUTOWSKI, W. J.: WRF winter extreme daily precipitation over the North American CORDEX Arctic, **Journal of Geophysical Research**, v. 119, p. 10738–10748, 2014.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**. v.29. Art. N° p.1693, 2002.

GUEDES, R. L. **Condições de grande escala associado a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul**. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade de São Paulo, 1985.

HOMANN, C. T. ; SILVA, A. S. ; AMARAL, L.C ; YAMASAKI, Y. . Análise do desempenho do modelo de previsão WRF para um evento extremo ocorrido no Rio Grande do Sul.. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém do Pará. 2010.

HONG, S. Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Monthly Weather Review**, v. 134, p. 2318–2341, 2006.

HOUZE, R.A. Cloud dynamics. **Academic Press**. INC, p. 573, 1993.

HERRMANN, M. L. de P. Atlas de Desastres Naturais de Santa Catarina. Governo do Estado de Santa Catarina, Secretaria do Estado de Defesa e Segurança do Cidadão. 2006.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA 582 pp.

JUNIOR, R. A. M.; ALVES, R. C. M.; MUNCHOW, G. B.; RODRIGUES, B. D.; JÚNIOR, R.S. S.; LUCCA, M. G.; CAUMO, M. Análise de sensibilidade das parametrizações no modelo WRF para o estado do Rio Grande do Sul durante o inverno de 2014. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 9, n.2, 2016.

KAIN, J.; FRISCH, J. Convective parameterization for mesoscale models: The kain-fritsch scheme. *Meteorological Monographs*, v. 24, p. 165–170, 1993.

KEE, J. U. KIM, S. Sensitivity Study on High-Resolution WRF Precipitation Forecast for a Heavy Rainfall Event. *Atmosphere*. v. 8, p. 96, 2017.

LEIVAS, J. F.; RIBEIRO, G. G.; SARAIVA, I.; SANTO, J. S. E.; SOUZA, M. B.; FILHO, J. R. Avaliação dos prognósticos de precipitação simulada pelo modelo BRAMS na Amazônia Ocidental na estação chuvosa. *Acta Amazônica*, v. 41, n. 3, p. 347-354, 2011.

LIM, K.-S. S.; HONG, S.-Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models, *Mon. Weather Rev.*, v. 138, p. 1587–1612. 2010.

LIN, Y. L.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 22, p. 1065-1092, 1983.

LOUREIRO, S. R.; SARAIVA, M. J.; SARAIRA, I.; SENNA, C. R.; FREDÓ, S. M. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. *Revista brasileira de meteorologia*, vol.29, p.83-94. 2014.

MACHADO, L. A. T. e W. B. ROSSOW, 1993:Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. v.121, p.3234-3259 *Mon. Wea. Rev.*, 1993.

MACHADO, L. A. T., GUEDES R. L., Formação e propagação de sistemas convectivos na América do Sul In: IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6 a 13 novembro de 1996, Campos de Jordão. SBMET, Anais. v. 2, p.1279-1283. 1996.

MACHADO, R.D. ; DA ROCHA, R. P. . Previsões climáticas Sazonais sobre o Brasil: avaliação do RegCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, p. 121-126, 2011.

MADDOX, R. A., Mesoscale convective complexes. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 61, p.1374-1387, 1980.

MARCELINO, I.P.V.O. **Análise de episódios de tornados em Santa Catarina: caracterização sinótica e mineração de dados**. Dissertação (Mestrado) - INPE, São José dos Campos. 2004.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. Episódios de jatos em baixos níveis ao leste dos Andes durante 13-19 de abril de 1999. **Revista brasileira de meteorologia**, v.17, p. 35-52, 2002.

MARENGO, J. A.; SOARES, W.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low level jet east of the Andes as derived from the NCEP/NCAR reanalyses. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2261-2280, 2004.

MEDEIROS, M.M.; GOMES, A.M.; NERY, J.T. Análise de sistemas convectivos de mesoescala no Estado de São Paulo: climatologia utilizando dados do radar Doppler de Bauru. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 2010, Fortaleza.

MEDINA, B. L.; SILVA, G. C.; NUNES, A. B.. Análise quantitativa dos eventos extremos de precipitação com potencial de inundação em Blumenau SC. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. CD-Rom dos anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010.

MILLER, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, . 190 pp. 1972.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 16663–16682, 1997.

MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que

atuam durante o ano. **Revista do Departamento de Geociências**, Florianópolis, v. 16, n. 31, p. 69-78, 2001.

NASCIMENTO, E. L.; DOSWELL, C. The need for an improved documentation of severe thunderstorms and tornadoes in south america. In: Symposium on the Challenges of severe convective storms. 86th Annual Meeting Atlanta,(GA), **Amer. Meteor. Soc.**, CD-ROM available from AMS. [S.l.: s.n.], 2006.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE-4008-TDL/239, 134 p., 1986.

OLIVEIRA, E. M. G. ; PIVA, E. D. ; SANTOS, D. C. ; WEBLER, G. ; GUERRA, V. S. . Avaliação do modelo WRF com diferentes parametrizações convectivas para um caso de ciclogênese na Bacia do Prata. **Ciência e Natura** , v. 1, p. 100-102, 2013.

OLIVEIRA, M, G, L. **Impacto dos aerossóis atmosféricos na formação de nuvens e precipitação sobre a região metropolitana de São Paulo**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 2012.

OLIVEIRA, E. M. G. **Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

OLIVEIRA, R. **Tornado de Xanxerê-2015: Análise sinótica e caracterização das condições atmosféricas usando o modelo WRF**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v.56, p.527-530. 1975.

PENNELLY, C., G. REUTER, and T. FLESCHE, Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta, **Atmos. Res.**, v. 135–136, p. 172–192, 2014.

QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; OLIVEIRA, G. S. Climatologia de precipitação e temperatura. Climanálise, edição especial comemorativa de 10 anos. 1996.

REED, R. J. Cyclogenesis in polar air streams. **Mon. Wea. Rev.**, v.107, p.38-107. 1979

RUIZ, J. J.; SAULO, C.; NOGUÉS-PAEGLE, J. WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, Boston, v. 138, p. 3342-3355, 2010.

SANTOS, D. C.; NASCIMENTO, E. L.. Simulações numéricas em alta resolução de um complexo convectivo de mesoescala com diferentes condições iniciais e de contorno. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 225-227, 2013.

SANTOS, A. T. S.; **Um estudo sobre a variabilidade do vento no nordeste do Brasil através de métodos estatísticos e via modelos dinâmicos de meso e micro escala.** (Doutorado em Ciências Climáticas). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2014.

SAHA, S., MOORTHY, S., PAN, H., WU, X., WANG, J., NADIGA, S., TRIPP, P., KISTLER, R., WOLLEN, J., BEHRINGER, D., LIU, H., STOKES, D., GRUMBINE, R., GAYNO, G., WANG, J., HOU, Y., CHUANG, H., JUANG, H., SELA, J., IREDELL, M., TREADON, R., KLEIST, D., VANDELST, P., KEYSER, D., DERBER, J., EK, M., MENG, J., WEI, H., YANG, R., LORD, S., VAN DEN DOOL, H., KUMAR, A., WANG, W., LONG, C., CHELLIAH, M., XUE, Y., HUANG, B., SCHEMM, J., EBISUZAKI, W., LIN, R., XIE, P., CHEN, M., ZHOU, S., HIGGINS, W., ZOU, C., LIU, Q., CHEN, Y., HAN, Y., CUCURULL, L., REYNOLDS, R., RUTLEDGE, G., GOLDBERG, M. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** 91, 1015–1057. 2010.

SALVADOR, N.; LORIATO, A. G. ; MOREIRA, D. M. ; ALBUQUERQUE, T. T. A. . Análise de Desempenho do Modelo WRF na Reprodução de um Evento Extremo de Precipitação Ocorrido em Outubro de 2009, na Região da Grande Vitória. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2011.

SEVERO, D. L. Modelos conceituais para situações de chuvas intensas no Estado de Santa Catarina. **Revista Tecno-Científica**, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, v. 4(14), p. 7-20. 1996.

SIKDER, S.; HOSSAIN F. Assessment of the weather research and forecasting model generalized parameterization schemes for advancement of precipitation forecasting in monsoon-driven river basins. **J. Adv. Model. Earth Syst**, v. 8, p. 1210–1228, 2016.

SILVA, G. C. ; NUNES, A. B. . Análise de eventos extremos de precipitação no leste de Santa Catarina: Estudo de Tendência. **Ciência e Natura**, v. micro., p. 251-254, 2011.

SILVA, S. B. V., KOUSKY, E. V., SHI, W., HIGGINS, W; An Improved Grided Historical Daily Precipitation Analysis for Brazil. **Journal Hydrometeorology**. v. 8, p. 848-861, 2007.

SILVA, A. F. G. **Avaliação do modelo WRF ao perfil do vento no Centro de Lançamento de Alcântara**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.

SILVA, A. F. G.; FISCH, G. Coerência termodinâmica do padrão espacial de chuvas previsto pelo modelo WRF durante o projeto chuva – Estação Alcântara 2010. **Revista Ciência e Natura**. Edição especial dezembro 2013. P. 181-182. 2013.

SILVA DIAS, M.A.F; LIMA, M.A. Deslocamento de linhas de instabilidade e sua relação com ventos em altitude. II Cong. Bras. de Meteor., Pelotas, RS, 18-22 outubro, 1982. Anais SBMET, v.1, p. 411-431, 1982.

SILVA DIAS, M.A.F. Complexos convectivos de mesoescala sobre a região sul do Brasil. *Climanálise*, 1,12, 1996.

SILVA DIAS, M. A. F.: Índices de Instabilidade para Previsão de Chuva e Tempestades Severas. Disponível em <www.martrier.iag.usp.br/ensino/indices.pdf> . Acesso em 04 de julho de 2016, 2000.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J. et al. NCAR Technical Note: A description of the Advanced Research WRF version 3, 113 p[S.l: s.n.], 2008.

SLEIMAN, J.; SILVA, M. E. S. Padrões atmosféricos associados a eventos extremos de precipitação sobre a região Sul do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 20, p. 93-109, 2010.

TEDESCHI, R.G; GRIM, A.M; CAVALCANTI, I.F.A. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. **Internacional Journal of Climatology**, n/a, 2016.

TEIXEIRA, M. S. **Caracterização física e dinâmica de episódios de chuvas intensas nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 167 pp. 2010.

THOMPSON, GREGORY, ROY M. RASMUSSEN, KEVIN MANNING: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. **Mon. Wea. Rev.**, 132, 519–542, 2004.

VELASCO, I.; FRITSCH, J.M., Mesoscale convective complexes in the Americas. **J. Geoph. Res.**, v.92, p.9591-9613, 1987.

WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 2d ed. International Geophysics Series, Vol. 91, Academic Press, 2006.

WEISMAN, M. L., KLEMP, J. B.: Characteristics of Convective Storms. In: Mesoscale Meteorology and Forecasting. Peter S. Ray Ed., **Amer. Meteor. Soc.**, p. 331-358. 1986.

ZAPAROLI, B. ; SALDANHA, C. B. ; ALVES, R. C. M. . Simulação numérica de um evento extremo de precipitação ocorrido na região de Pelotas-RS. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém - PA. Anais do XVI CBMET, 2010.

